

# 深宇宙探査技術実証機 DESTINY<sup>+</sup>用薄膜軽量太陽電池パドルへの デブリ衝突の影響評価

○中村徹哉, 豊田裕之, 金谷周朔, 西山和孝, 高島健 (宇宙航空研究開発機構)  
平井隆之 (千葉工業大学)

Evaluation of debris collision impact on lightweight solar paddle using thin-film solar cells for DESTINY<sup>+</sup>  
Tetsuya Nakamura, Hiroyuki Toyota, Shusaku Kanaya, Kazutaka Nishiyama, Takeshi Takashima  
(Japan Aerospace Exploration Agency)  
Takayuki Hirai (Chiba Institute of Technology)

Key Words: Lightweight solar array paddle, DESTINY<sup>+</sup>, Debris

## Abstract

New type lightweight solar array paddle using thin-film solar cells is being developed for DESTINY<sup>+</sup>. It is necessary to evaluate the debris collision impact on the new type solar cell paddle for sizing it. In this paper, we report the effect of debris collision impact on thin-film solar cells using soda lime glass particles of multiple sizes.

## 1. 目的および背景

人工衛星の太陽電池パドル (SAP) は太陽光エネルギーを効率的に吸収できるようにカバーガラスを除いて防護材を持たない。軌道上に存在するデブリやメテオロイド等の微小粒子に対しては、衝突ダメージを低減させるのではなく、予め電力損失量を予測し、その分を SAP の発生電力に加算して対処することが一般的である。したがって、電力損失量を算出するための SAP への微小粒子衝突の影響把握は非常に重要である。

既に微小粒子衝突による従来型 SAP の故障モードは明らかになっており、その詳細と設計指針に関しては宇宙航空研究開発機構 (JAXA) の設計・運用マニュアル<sup>1)</sup>に記載されている。しかし構造が従来型と異なる新型 SAP を用いる場合は、必ずしも上記指針が適用できるとは限らず、改めて超高速衝突実験の実施が必要な場合がある。現在、JAXA 宇宙科学研究所で検討が進められている小惑星 Phaethon フライバイを目指す深宇宙探査技術実証ミッション Demonstration and Experiment of Space Technology for Interplanetary Voyage (DESTINY) Phaethon flyby and dUst Science (PLUS) (以下 DESTINY<sup>+</sup>)<sup>2)</sup>はまさにその対象である。

DESTINY<sup>+</sup>は小型で高頻度な太陽系探査の実現に向けて、先進的な小型軽量化技術およびフライバイ技術を結集し、イプシロンロケットによって打ち上

げられる小型深宇宙探査機を実証するものである。DESTINY<sup>+</sup>は電気推進でスパイラル状に軌道上昇をする過程で比較的多くの微小粒子と衝突する。軌道にもよるが、100 μm 以下の微小粒子がミッション期間中で 5000 個以上衝突するため、微小粒子衝突による電力損失量の予測は、ミッション成立のため重要となる。

また DESTINY<sup>+</sup>では小型軽量化を実現するため新型の薄膜軽量 SAP<sup>3,4)</sup>を採用する。薄膜軽量 SAP は軽量化・高い収納性を実現した全く新しいタイプの SAP である。図 1 に示す通り、大きく分けて 4 つの新規開発要素 (①薄膜太陽電池セル<sup>5)</sup>, ②ガラスタイプスペースソーラーシート<sup>6)</sup>, ③曲面フレーム, ④パドル機構部品)がある。その中でも、従来型 SAP と比べ微小粒子衝突の影響が変わると考えられる新規要素は薄膜太陽電池セルである。薄膜太陽電池セルは、従来の宇宙用太陽電池と比べて厚さが 6 分の 1 程度で、太陽電池の表面電極と裏面電極の距離が近く、電極間の物理的接触による太陽電池の短絡が懸念されるためである。他にも、従来型 SAP は太陽電池がアルミハニカムパネルに張り付けられているのに対し、薄膜軽量 SAP はガラスレイシートをフレームに張り付けられていることから、裏面からの微小粒子入射による影響も考慮する必要があると考えられる。

以上より、DESTINY+のミッション成立のためには、新型薄膜軽量 SAP への微小粒子衝突による影響把握は必要不可欠と判断し、超高速衝突実験を実施した。

## 2. 実験条件

宇宙科学研究所の2段階式軽ガス銃を用いて超高速衝突実験を行った。被衝突体は100 $\mu\text{m}$ 厚のカバーガラスを有するガラスアレイシート、衝突体はソーダ石灰ガラス粒子をそれぞれ用いた。衝突体速度は約6km/sで固定し、粒径を50, 100, 200, 330 $\mu\text{m}$ と変化させた。衝突面は太陽電池受光面とし、また太陽電池の動作状態は発電状態を模擬した。衝突の影響評価は、光照射時の電流電圧特性(LIV)、顕微鏡写真、サーモグラフィで行った。

## 3. 実験結果

各粒径の衝突体による衝突痕の顕微鏡写真を図2に示す。図2(a)-(d)から衝突痕サイズは、衝突体粒径が50, 100, 200, 330 $\mu\text{m}$ のとき、それぞれ約350 $\mu\text{m}$ 、約400 $\mu\text{m}$ 、約550 $\mu\text{m}$ 、約2mmであった。粒径50, 100 $\mu\text{m}$ の場合は、衝突体はガラスアレイシートを貫通しておらず、一方粒径200, 300 $\mu\text{m}$ では、衝突体はガラスアレイシート全層を貫通していた。

LIV特性から電気特性の変化を評価した。粒径が50 $\mu\text{m}$ と100 $\mu\text{m}$ の場合、LIV特性の変化は小さかったが、粒径200 $\mu\text{m}$ では2ショット中1ショット(2サンプル中1サンプル)で、粒径330 $\mu\text{m}$ では4ショット中1ショット(4サンプル中1サンプル)で短絡故障が見られた。

太陽電池セルに電流を注入した時の発熱をサーモグラフィで確認することで短絡故障を特定した。特定した短絡故障箇所の顕微鏡写真を図2(e), (f)にそれぞれ示す。粒径200 $\mu\text{m}$ の衝突体による短絡故障は太陽電池セル電極パッド上の衝突に起因していることが分かった(衝突箇所の顕微鏡写真は図2(e)に示す)。電極パッドの上には太陽電池セル間の電気的接続を担うインターコネクタが溶接させている。インターコネクタの厚さは太陽電池セルと同程度である。短絡故障箇所の顕微鏡写真からは、衝突体はインターコネクタも貫通しており、また金属が衝突痕の内側にも回り込んでいる様子が確認できる。このことから粒径200 $\mu\text{m}$ の衝突体による短絡故障は、ガラスアレイシートを貫通するような高エネルギーな微小粒子がインターコネクタ上に衝突し、インターコネクタがセル内に侵入し表面電極と裏面電極を直接金属で導通することによると考えられる。

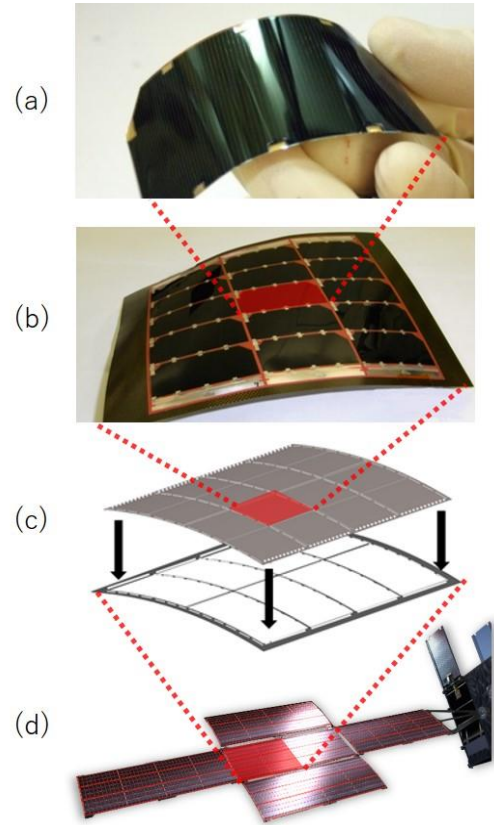


図1 (a)高効率薄膜太陽電池セル, (b)ガラスタイプアレイシート, (c)曲面フレーム, (d)軽量パドル

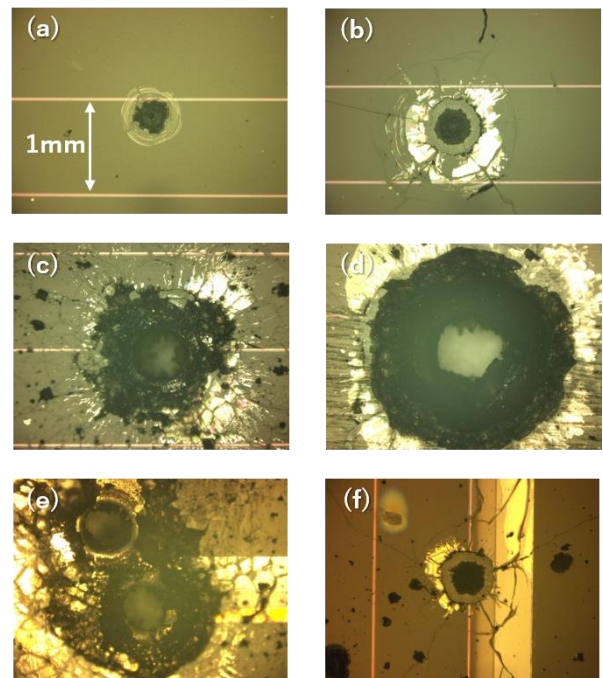


図2 衝突痕の顕微鏡写真 (a)衝突体サイズ50 $\mu\text{m}$ , (b) 衝突体サイズ100 $\mu\text{m}$ , (c) 衝突体サイズ200 $\mu\text{m}$ , (d) 衝突体サイズ330 $\mu\text{m}$ , (e)衝突体サイズ200 $\mu\text{m}$ 短絡箇所, (f)衝突体サイズ330 $\mu\text{m}$ 短絡箇所

また、粒径  $330\ \mu\text{m}$  の衝突体による短絡故障は、太陽電池セル電極上の衝突に起因していることが分かった（衝突箇所の顕微鏡写真は図 2(f)に示す）。しかし、この短絡に寄与している衝突痕の直径はわずか  $370\ \mu\text{m}$  程度で、図 2(d)のように粒径  $330\ \mu\text{m}$  の衝突体による直径  $2\text{mm}$  の衝突痕に比べると非常に小さい。衝突体粒径と衝突痕サイズの相関から、この短絡に寄与している衝突痕は  $50\sim 100\ \mu\text{m}$  の衝突体によるものと考えられる。おそらく粒径  $330\ \mu\text{m}$  の衝突体が供試体に到達する前に砕けたものである。

そこで、粒径が  $50\sim 100\ \mu\text{m}$  の衝突体によって短絡故障が発生するか追加検証を行った。衝突体はソーダ石灰ガラスで、粒径は  $80\ \mu\text{m}$ 、速度は約  $6\text{km/s}$  とした。粒径  $80\ \mu\text{m}$  の衝突体による衝突痕の直径は約  $380\ \mu\text{m}$  で、図 2(f)に示す短絡故障を引き起こした衝突痕サイズと同程度であった。LIV 特性から電気特性の変化を確認したところ、3 ショット中 2 ショット（3 サンプル中 2 サンプル）で短絡故障が起こった。うち 1 サンプルでは短絡故障箇所の特定には至らなかったが、もう 1 サンプルでは短絡故障箇所は図 3 に示す顕微サーモグラフィより、電極上であることが分かった。これは粒径  $330\ \mu\text{m}$  の実験結果を再現している。以上より、セルを貫通しないような低エネルギーな微小粒子が電極上に衝突した場合、短絡故障に至る可能性が高いことが分かった。しかし短絡の要因特定はできておらず、今後は衝突痕内部の組成分析などによって短絡故障要因を特定し、必要に応じて劣化モデルを構築する予定である。

#### 4. まとめ

DESTINY<sup>+</sup>で採用する薄膜軽量 SAP への微小粒子衝突の影響を評価するため、ソーダ石灰ガラスを用いた超高速衝突実験を実施した。その結果、ガラスアレイシートを貫通するような高エネルギーな微小粒子がインターコネクタ上で衝突した場合、インターコネクタがセル内に侵入し短絡故障に至る可能性があることを、またセルを貫通しないような低エネルギーな微小粒子が電極上に衝突した場合、短絡故障に至る可能性があることを、それぞれ確認した。今後短絡故障要因特定のための、詳細解析を実施する。

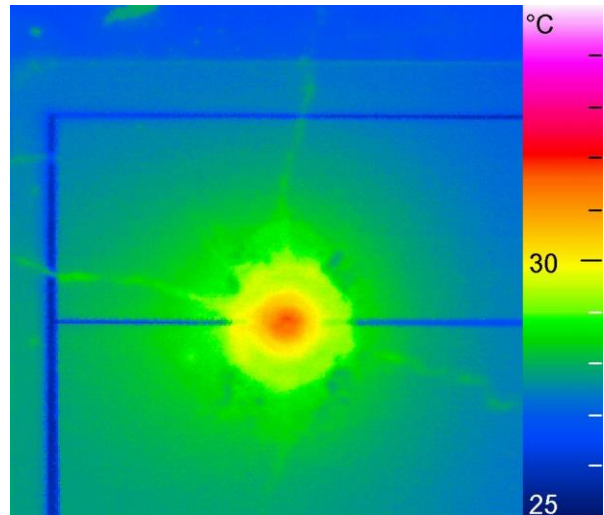


図3 粒径  $80\ \mu\text{m}$  の衝突体による短絡箇所の顕微サーモグラフィ画像。太陽電池セルへの電流注入により短絡箇所が発熱している。カラースケールはセル表面温度を表す。

#### 謝辞

本検討を行うにあたり、ご協力頂いたシャープ株式会社ならびに日本電気株式会社の関係各位に感謝いたします。また本試験実施にあたり、ご協力頂いた長谷川直様をはじめとする ISAS 大学共同利用実験調整グループの関係各位に感謝致します。

#### 参考文献

- 1) スペースデブリ発生防止対策 設計・運用マニュアル JERG-0-002-HB001.
- 2) 高島健, 西山和孝, 豊田裕之, 山本高行, 佐藤俊介, 川勝康弘, 荒井朋子, DESTINY<sup>+</sup>所内準備チーム, 第 19 回宇宙科学シンポジウム, S3-002.
- 3) 中村徹哉, 柴田優一, 住田泰史, 今泉充, 豊田裕之, 川勝康弘:「DESTINY 用薄膜軽量太陽電池パドルの開発」, 第 60 回宇宙科学技術連合講演会, 2D06.
- 4) 住田泰史, 柴田優一, 中村徹哉, 今泉充:「150W/kg 軽量太陽電池パドル機構の軌道上展開実証」, 第 60 回宇宙科学技術連合会, 4F08.
- 5) T. Takamoto, T. Agui, A. Yoshida, K. Nakaido, H. Juso, K. Sasaki, K. Nakamura, H. Yamaguchi, T. Kodama, H. Washio, M. Imaizumi, and M. Takahashi, “World’s Highest Efficiency Triple-junction Solar Cells Fabricated by Inverted Layers Transfer Process”, Proc. 35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Honolulu, Hawaii U.S.A., 2010, pp.412-417.

- 6) H. Yamaguchi, R. Ijichi, Y. Suzuki, S. Ooka, K. Shimada, N. Takahashi, H. Washio, K. Nakamura, T. Takamoto, M. Imaizumi, T. Sumita, K. Shimazaki, T. Nakamura, T. Ohshima, "Development of Space Solar Sheet with Inverted Triple-junction Cells", Proc. 42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, 2015, pp.1-5.